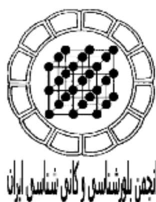
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۹، از صفحهٔ ۱۷۱ تا ۱۸۴



مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی و زمین فیزیک اکتشافی مگنتیت در گستره سنجدک III، ناهنجاری شرقی معدن سنگان (خراسان رضوی)

مصطفی انصاری، عباس اعتمادی*، حمید حافظی مقدس، محمدرضا حیدریان شهری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۱۵، نسخه نهایی: ۹۸/۴/۲۶)

چکیده: معدن آهن سنگان با خاستگاه از نوع اسکارن، در شمال شرق ایران (استان خراسان رضوی) در پهنه ایران مرکزی و شمال شرق زیر پهنه قطعه لوت قرار دارد. نهشته معدنی سنجدک III، از جمله ناهنجاری‌های شرقی معدن سنگان است که انتهای شرقی کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن را دربر می‌گیرد. زمین‌شناسی منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین (دایک و توده‌های نفوذی)، دگرگونی (اسکارن، اسلیت و فیلیت) و رسوبی (ماسه‌سنگ، سنگ آهک و دولومیت) است. مجموعه کانه‌زایی در منطقه مورد بررسی از نوع اگزواسکارن است و کانی‌سازی‌هایی از مگنتیت، پیروتیت، کالکوپیریت، پیرولوزیت، پیریت، آرسنوپیریت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت و مالاکیت را دربر می‌گیرد. کانی‌سازی‌های سولفیدی همراه با مرحله پسرونده اسکارن‌زایی دیده می‌شوند در حالی که کانی‌سازی‌های اکسیدی-هیدروکسیدی وابسته به پهنه‌های گسلی هستند. بررسی‌های مغناطیس‌سنجی زمینی سه ناهنجاری مغناطیسی A، B و C را در منطقه نشان می‌دهد که دو ناهنجاری A و B خاستگاه عمقی دارند و با هم در ارتباط هستند. جدایش این ناهنجاری‌ها به فعالیت گسل‌های فرعی نسبت داده می‌شود. ناهنجاری مغناطیسی C نیز که بر رخنمون مگنتیت در بخش‌های شرقی منطقه منطبق است ضعیف‌تر است و خاستگاه عمقی ندارد. از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان به منظور ادامه عملیات اکتشافی در نقاط دارای ناهنجاری عمقی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: *زمین‌شناسی؛ کانی‌سازی؛ مغناطیس‌سنجی؛ اسکارن؛ سنجدک III؛ معدن سنگان.*

مقدمه

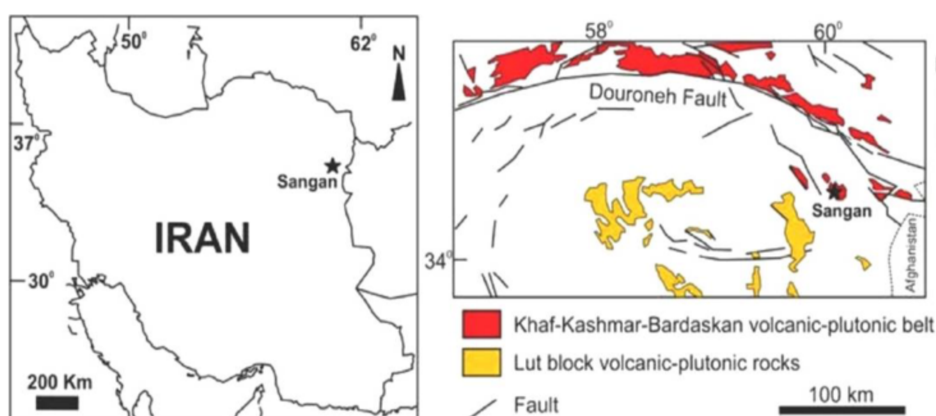
مجموعه معادن سنگان در ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرق مشهد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرق خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرق شهر سنگان قرار دارد و گستره سنجدک III، بخشی از ناهنجاری شرقی این معدن به شمار می‌آید (شکل ۱). بر اساس تقسیم‌بندی ساختاری زمین‌شناسی ایران توسط اشتوکلین [۱]، منطقه مورد بررسی در پهنه شرق ایران قرار دارد، درحالی‌که با توجه به تقسیم‌بندی مرجع [۲] که بر اساس وضعیت ساختاری و ارتباط حوضه‌های رسوبی صورت گرفته است، این منطقه بخشی از ایران مرکزی است که در شمال شرق قطعه لوت و در دورترین نقطه گسل درونه در منطقه سنگان خواف واقع است.

منطقه مورد بررسی جزئی از کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن به شمار می‌رود. این کمربند ماگمایی با گسترش شرقی-غربی در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) واقع است. کریم‌پور [۳] این کمربند را به عنوان یک کمربند کانی‌سازی نوع اکسید آهن همراه با مس و طلا (IOCG) در ایران معرفی کرده است. از جمله کانسارهای موجود در این کمربند می‌توان به طلا-اسپکیولاریت کوه زر، تنورجه و معدن سنگان خواف اشاره کرد. در مورد خاستگاه معدن سنگان تا کنون نظریه‌های مختلفی چون خاستگاه آتشفشانی-رسوبی [۴]، ارائه شده است، اما پژوهش‌های جدیدتر نشان از آن دارد که خاستگاه این کانسار را می‌توان از ذخایر نوع IOCG (نوع

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۰۷۴۱۷۴۳، پست الکترونیکی: abbas.etemadi@mail.um.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]

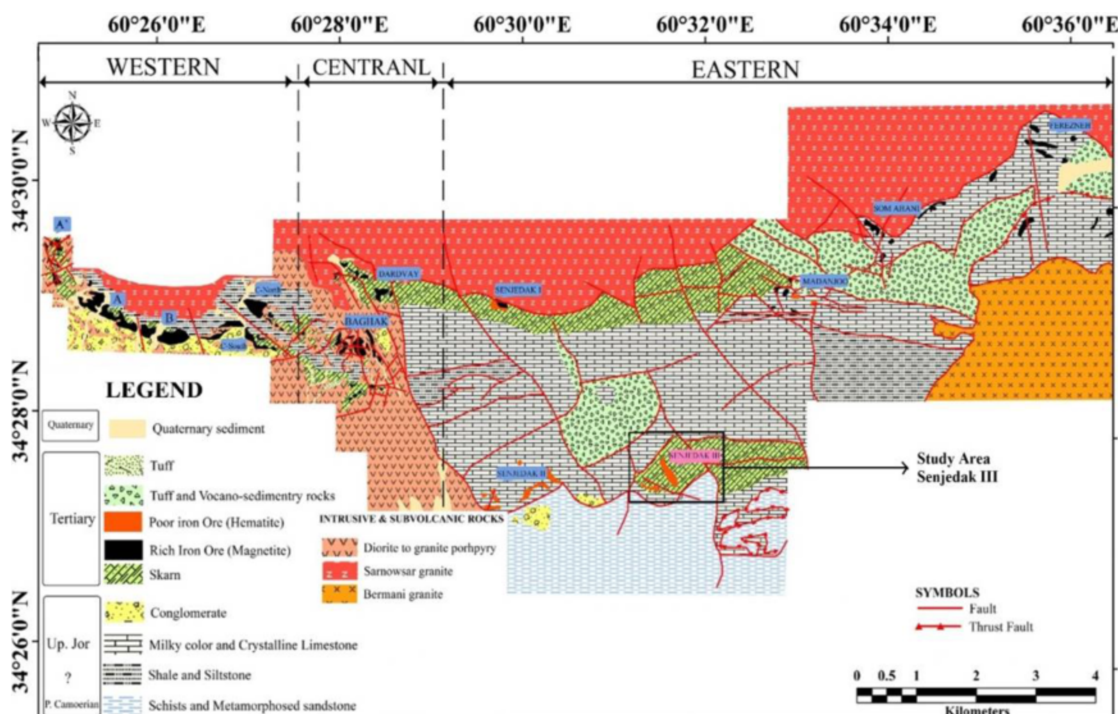
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]



شکل ۱ جایگاه معدن سنگان در ایران، کمربند خواف- کاشمر- بردسکن [۶].

مگنتیت Fe-Oxides) در نظر گرفت که بر اثر فرایند اسکارنی- شدن ایجاد شده است [۵، ۷].

بزرگترین عامل ساختاری اثرگذار در منطقه، گسل بزرگ درونه است که قطعه لوت را از کمربند خواف-کاشمر-بردسکن جدا می‌کند. این کانسار به سه ناهنجاری بزرگ شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده ([۸]؛ شکل ۲) و هر بخش خود شامل چند کانسار است. کانسارهای بخش شرقی شامل ۶ ناهنجاری سنجدک I، سنجدک II، سنجدک III، معدن جو، سم آهنی و فرزنه است که در حد فاصل کانسارهای مرکزی تا روستای فرزنه جای دارند ([۹]؛ شکل ۲). ناهنجاری‌های بخش شرقی، مراحل اکتشاف مقدماتی را می‌گذرانند و دانش بسیار کمی از زمین‌شناسی و کانه‌زایی آنها موجود است. در این پژوهش، منطقه اکتشافی سنجدک III که از ناهنجاری‌های بخش شرقی مجموعه معادن سنگ آهن سنگان است، بررسی شده است. هدف این پژوهش، بررسی زمین‌شناسی منطقه سنجدک III، بررسی کانی‌سازی با تأکید بر روابط همبرزایی و بافتی، بررسی مغناطیس‌سنجی زمینی بر رخنمون‌های مگنتیت جهت تعیین وضعیت کانی‌سازی در عمق بوده است.



شکل ۲ نقشه کلی زمین‌شناسی معدن سنگان همراه با جایگاه کانی‌سازی‌های آهن (برگرفته از مرجع [۶،۱۰،۱۱]) و منطقه مورد بررسی در بخش شرقی معدن سنگان.

روش بررسی

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش مجموعه‌ای از برداشت‌های صحرایی، بررسی‌های آزمایشگاهی و پژوهش‌های علمی انجام شده است که عبارتند از: الف) نمونه‌برداری از رخنمون‌های سطحی و بررسی ۶۴ مقطع نازک به منظور تهیه نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی، ب) تهیه و بررسی ۲۰ قطعه صیقلی و ۱۵ عدد مقطع نازک صیقلی از نمونه‌های سطحی به منظور بررسی کانی‌سازی و روابط همبری کانی‌ها، پ) تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی با استفاده از نرم افزار Arc Map 10.4.1 با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ در منطقه‌ای به وسعت ۴ کیلومتر مربع، ت) اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ۶۰ نمونه از واحدهای سنگی و کانی‌سازی با استفاده از دستگاه پذیرفتاری‌سنج مدل GMS2 با دقت 1×10^{-5} SI با هدف تعیین اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای مختلف جهت تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی و ث) بررسی مغناطیس‌سنجی زمینی بر رخنمون‌های مگنتیت با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نوع پروتون مدل ENVI با دقت یک گاما و تهیه نقشه‌های موضوعی زمین فیزیکی با استفاده از نرم‌افزار ER Mapper 7.01 به منظور بررسی وضعیت کانی‌سازی عمقی پیرامون رخنمون‌های سطحی مگنتیت.

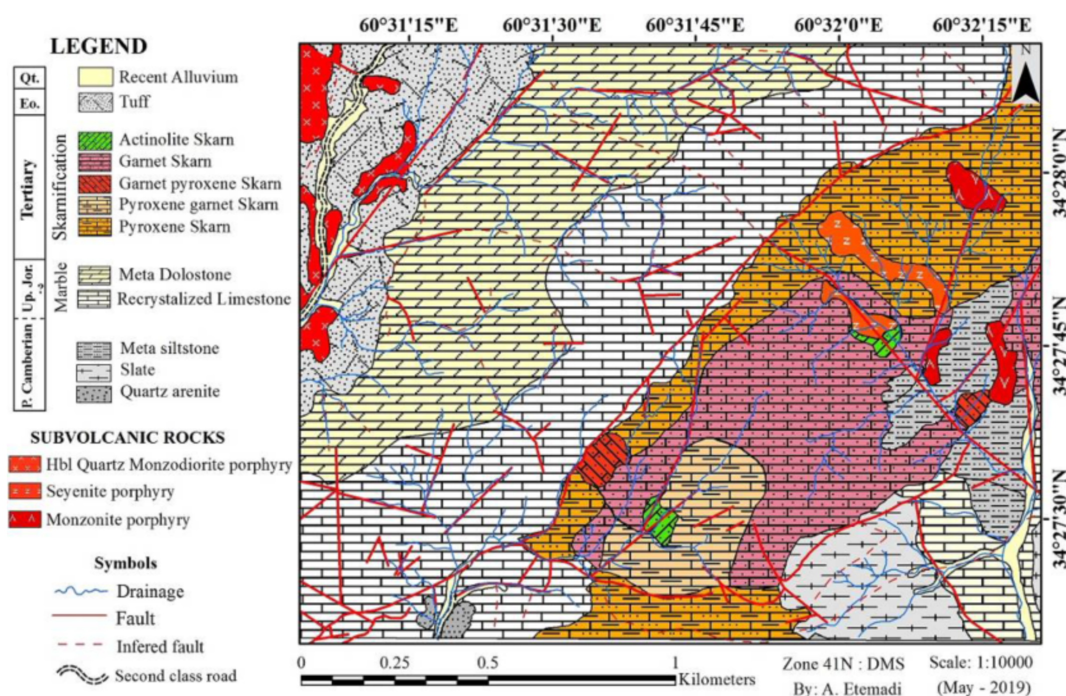
زمین شناسی

گستره سنجدک III، بخشی از ناهنجاری شرقی معدن سنگان است که بین طول‌های جغرافیایی ″۰۳ ′۳۱ °۶۰ تا ″۲۲ ′۳۲ °۶۰ و عرض‌های جغرافیایی ″۱۸ ′۲۷ °۳۴ تا ″۱۰ ′۲۸ °۳۴ قرار دارد. مجموعه معدنی سنگان خواف جزئی از کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن با طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر (از افغانستان تا بیارجمند) و پهنایی متغیر از ۱۵ تا ۸۰ کیلومتر بوده که بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و گاه مافیک ترشیری تشکیل شده است [۱۲]. در منطقه سنگان، قدیمی‌ترین واحدها را چرت، شیل‌های سیلیسی، ماسه‌سنگ و آهک بلورین (با سن پرکامبرین تا ژوراسیک پسین؟) تشکیل می‌دهند. سنگ‌های آتشفشانی مربوط به فعالیت‌های آتشفشانی در گستره زمانی کرتاسه تا اوایل ائوسن شامل داسیت، ریوداسیت، تراکیت، پیروکلاست-های آندزیتی و سنگ‌های آتشفشان آواری هستند. سنگ‌های کربناته ژوراسیک پسین و کرتاسه پیشین، بیشتر به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند و به سمت شرق به صورت آهک بلورین یافت می‌شوند. کانی‌سازی در این سنگ‌ها به صورت انواع اسکارن رخ داده است [۱۳].

گستره سنجدک III در بخش مرکزی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تایباد [۱۴] و گوشه شمال غرب نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موسی آباد قرار دارد. زمین‌شناسی ناهنجاری‌های شرقی معدن سنگان به طور کلی شامل مجموعه‌های دگرگونی، آذرین (دارای گسترش بسیار به ویژه در مورد نفوذی‌ها) و رسوبی همراه با کانی‌سازی آهن است. قدیمی‌ترین واحد زمین-شناسی در این منطقه، فیلیت با راستای شرقی-غربی است که در قسمت‌های جنوبی منطقه رخنمون دارد. بر اساس پژوهش-های پیشین [۱۱]، سن مجموعه‌های دگرگونی در قسمت‌های جنوبی منطقه مورد بررسی، پرکامبرین است. توده‌های اسکارنی که حدود یک سوم منطقه را به خود اختصاص داده‌اند، در قسمت‌های مرکزی با روند شمال شرق-جنوب غرب رخنمون دارند. مجموعه‌ای از پهنه‌های اسکارنی شامل گارنت اسکارن، گارنت پیروکسن اسکارن، پیروکسن اسکارن، پیروکسن گارنت اسکارن و آمفیبول اسکارن در منطقه دیده می‌شوند (شکل ۳). در توده‌های نفوذی مونزونیتی و سینیتی که در مرکز منطقه سنجدک III رخنمون دارند انداسکارن تشکیل نشده است، یعنی سیلیکات‌های آهکی بدون آب (پیروکسن و گارنت) که شاخص مرحله دگرنهادی پیش رونده هستند و یا سیلیکات‌های آهکی آبدار (اپیدوت و ترمولیت- اکتینولیت) که نتیجه دگرگونی سیلیکات‌های آهکی اولیه و شاخص مرحله پسرونده آغازی هستند در لبه توده‌های نفوذی حضور ندارند. از طرفی، رگچه‌های کربناتی و سیلیسی، هم در واحد اسکارن و هم در توده نفوذی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده اثرپذیری توده نفوذی از محلول‌های کربناتی-سیلیسی مرحله پسرونده تأخیری هستند. آهک‌های شیری تا سفید رنگ، گسترش به نسبت کمی در قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی منطقه دارند. آهک‌های بلوری در قسمت‌های مرکزی با روند شمال شرق-جنوب غرب گسترش بسیاری دارند که توسط گسل اصلی منطقه با روندی مشابه جابجا شده و در کنار اسکارن‌ها قرار گرفته‌اند. توف، سنگ‌های آذرآواری و نفوذی‌های هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری در قسمت‌های شمال غرب منطقه مورد بررسی رخنمون دارند. جدیدترین سازندهای منطقه، آبرفت‌های کواترنری هستند که در قسمت شمال شرق و جنوب غرب منطقه گسترش دارند (شکل ۳).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]



شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه سنجدک III، بخش شرقی معدن سنگ آهن سنگان.

کانی‌سازی

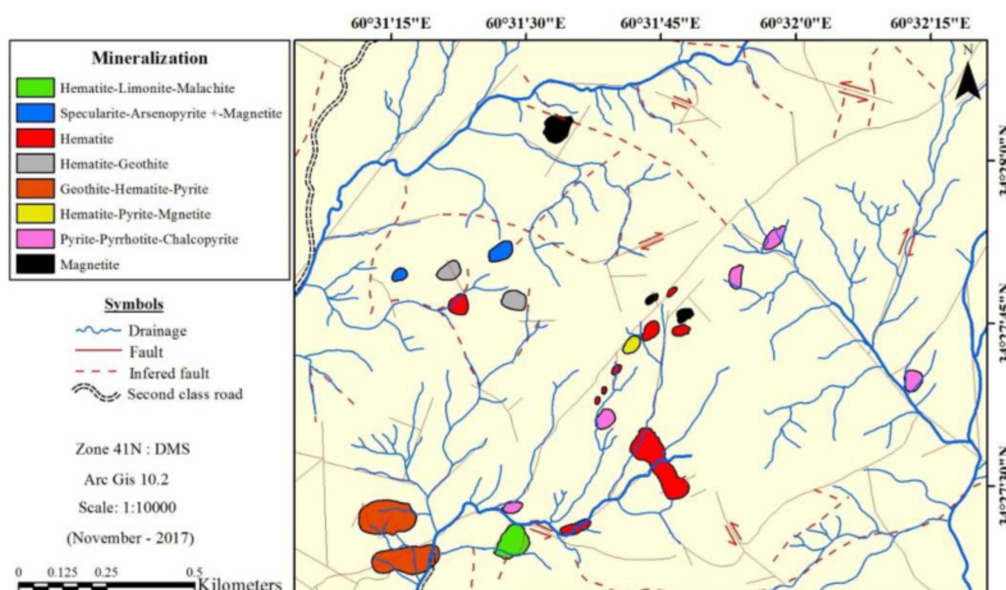
کانی‌سازی آهن در منطقه معدن سنگان از نوع گرمابی است. محلول‌های کانه‌دار از محل گسل‌ها وارد شده و در راستای آن‌ها در سنگ میزبان کربناتی جایگزین شده‌اند. کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی به دو شکل اکسیدی-هیدروکسیدی و سولفیدی دیده می‌شود. بخش اکسیدی-هیدروکسیدی شامل مگنتیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، مالاکیت، پیرولوزیت و بخش سولفیدی شامل پیروتیت، پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت است. کانی‌سازی اکسیدی-هیدروکسیدی در منطقه سنجدک III نیز دارای روند کلی کانی‌سازی در معدن سنگان است. راستای بیشتر گسل‌های منطقه مورد بررسی شمال شرق-جنوب غرب است (شکل ۳). با توجه به روند گسل‌ها، کانی‌سازی اکسیدی-هیدروکسیدی و به ویژه مگنتیت، بیشتر وابسته به پهنه‌های گسلی بوده و بصورت رگه‌ای-رگچه‌ای و در برخی موارد بصورت توده‌ای در راستای گسل‌ها تشکیل شده است. این در حالی است که کانی‌سازی سولفیدی بصورت افشان و وابسته به پهنه آمفیبول اسکارن بوده که نشان‌دهنده ارتباط کانی‌سازی سولفیدی با مرحله پسرونده تأخیری در فرآیند اسکارنی شدن است (شکل ۴). کانی‌سازی در رگچه‌ها از لبه به مرکز به ترتیب شامل مگنتیت، هماتیت، پیرولوزیت و کلسیت است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، کانی‌سازی در منطقه سنجدک III به شرح زیر است.

مگنتیت: این کانه بیشتر در مرز واحدهای اسکارنی و واحد آهک بازتبلور یافته دیده می‌شود و حضور آن بصورت رگه-رگچه‌ای و در برخی موارد توده‌ای است که کنترل گسلی دارد. مقدار این کانه در قطعه‌ها و مقاطع تهیه شده از کمتر از ۵٪ تا حدود ۸۵٪ متغییر است. بلورهای آن بیشتر نیمه خودشکل تا بی‌شکل و با اندازه ۰/۳ تا ۰/۵ میلیمتر هستند. بافت غالب مگنتیت از نوع متراکم و توده‌ای بوده ولی بافت‌هایی چون مارتیتی‌شدن، منطقه‌بندی، افشان، بِرشی و رگچه‌ای نیز قابل مشاهده است. کانی باطله همراه با مگنتیت اغلب کلسیت و کوارتز است.

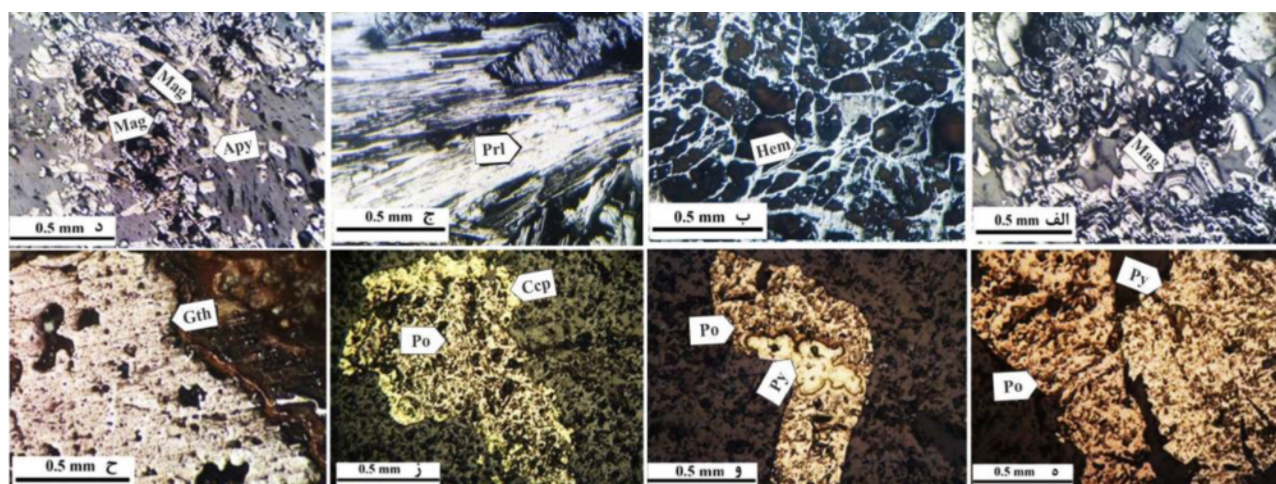
حضور مگنتیت مارتیتی‌شده می‌تواند دلیلی بر تبدیل مگنتیت به هماتیت در شرایط دگرسانی با دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط اکسایشی باشد [۱۵]. از دیگر بافت‌های بی مانند این کانه، بافت منطقه‌بندی یا پوسته‌ای است (شکل ۵ الف). رامدور [۱۶] این بافت را به کانسارهای دگرنهاده مجاورتی نسبت داده است. با توجه به این مطالب و شواهد، بافت منطقه‌بندی در مگنتیت‌های سنگان ممکن است تحت تاثیر سه عامل باشد: ۱) آزادسازی آهن از ساختار گارنت نوع

آندرادیتی [۱۷]، ۲) تشکیل در شرایط دگرنهادی مجاورتی و ۳) آزاد شدن یک فاز گازی از یک محلول ابر اشباع از آهن در نزدیکی سطح زمین. خروج سریع مواد فراری چون HCl و H_2O عامل مهمی در کاهش دمای پایداری کمپلکس‌های اشباع از آهن در سطح است و باعث تشکیل بافت‌های نامتعادل در مگنتیت می‌شود [۱۸]. چنین بافتی تنها به سیستم‌های گرمابی و نه سیستم ماگمایی نسبت داده می‌شود. در مقاطع تهیه شده، گارنت همراه با کانی‌سازی مگنتیت دیده نشد.

همچنین در اسکارن‌های منطقه، توده نفوذی وابسته به اسکارن (اسکارن نوع نزدیک به خاستگاه) دیده نمی‌شود. از طرفی، پیرامون رگه‌های مگنتیتی در سنگ میزبان آهکی اثری از دگرسانی وجود ندارد که ممکن است ناشی از دمای پایین محلول آهن‌دار (بدلیل حضور مواد فرار) و یا جابجایی بعدی کانی‌سازی توسط گسل نسبت داده شود. از این رو به نظر می‌رسد که تشکیل مگنتیت وابسته به عامل سوم بوده است.



شکل ۴ نقشه کانی‌سازی منطقه سنجدک III، بخش شرقی معدن سنگ آهن سنگان.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی: الف) مگنتیت[Mag] با بافت ج) منطقه‌بندی، ب) هماتیت [Hem] با بافت جعبه‌ای، پ) پیرولوزیت [Prl]، ت) مگنتیت [Mag] و آرسنوپیریت [Apy]، ث) پیروتیت [Po] و پیریت نسل اول [Py]، ج) پیروتیت [Po] همراه با پیریت نسل دوم [Py]، چ) کالکوپیریت [Ccp] جانشین شده در لبه پیروتیت [Po] و ح) گوتیت [Gth] با بافت گل کلمی در لبه هماتیت [Hem]. مخفف‌ها برگرفته از مرجع [۲۹] هستند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

هماتیت: کانه‌زایی هماتیت در منطقه معدنی سنگان به دو شکل دیده می‌شوند [۱۹]: ۱) هماتیت‌های برآمده از هوازدگی مگنتیت که در نمونه‌های سطحی به فراوانی دیده می‌شوند و ۲) هماتیت‌های ناشی از محلول‌های گرمابی جدیدتر که در شرایط اکسایشی تشکیل شده‌اند. این هماتیت‌ها به صورت رگچه‌ای هستند، اما هماتیت‌های منطقه سنجدک III با بافت جانشینی و بصورت مارتیتی‌شدن در مگنتیت دیده می‌شوند. در اثر این فرآیند که پس از سرد شدن توده نفوذی و همزمان با هجوم سیال‌های دمای پایین روی می‌دهد مگنتیت در راستای برگوارگی‌های خود به مارتیت تبدیل می‌شود [۱۶]. هماتیت-های بررسی شده در برخی قسمت‌ها بافت رگچه‌ای نیز نشان می‌دهند (شکل ۵ ب) که ناشی از محلول‌های گرمابی نهایی در شرایط اکسایشی هستند. این نوع هماتیت در بخش‌هاي نزديک به سطح، در مناطقي كه كانه‌زايي رخنمون داشته و مگنتيت در معرض هوازدگی قرارگرفته، تشكيل شده است که برآمده از اكسايش مگنتيت هستند. در اين بافت، الياف‌هاي ظريف هماتيت با حالتي در هم، يكديگر را قطع مي‌كنند بطوريكه يک حالت لانه زنبوري در نمونه بوجود مي‌آيد. کریگ و همکاران [۲۰]، از این بافت که در گوسان‌ها نیز دیده شده است. با نام بافت جعبه‌ای (Boxwork) یاد می‌کنند.

پیرولوزیت: این کانی‌سازی بصورت رگچه‌ای و در واحد دولومیتی رخ داده است. فراوانی رگچه‌ها کم و بصورت پراکنده است. بلورهای آن بصورت کشیده و بسیار پهن و با اندازه ۱ تا ۳ میلیمتر با فراوانی ۳۰٪ تا ۳۵٪ دیده می‌شود (شکل ۵ پ). کانی باطله همراه با آن کلسیت بوده و پس از مگنتیت که در لبه رگچه‌ها قرار گرفته، در مرکز تشکیل شده است. آگرگات سوزنی آن به واسطه داشتن بلورهای درشت لوحه‌ای در نمونه دستی و رنگ کرم مایل به زرد، چند رنگی و رنگ ناهمسان قهوه‌ای تا آبی از اسپکیولاریت که در ناهنجاری شرقی منطقه سنجدک II گزارش شده [۲۱] قابل تشخیص است.

آرسنوپیریت: این کانه بصورت پراکنده در سنگ میزبان دولومیتی رخ داده است. اندازه بلورها ۰/۳ تا ۰/۴ میلیمتر و فراوانی آن‌ها ۴ ٪ تا ۵ ٪ است. آرسنوپیریت در برخی قسمت‌ها، بافت جزیره‌ای نشان می‌دهد و باطله همراه با آن کلسیت است (شکل ۵ ت). این کانه در بعضی قسمت‌ها توسط بلورهای پیرولوزیت در بر گرفته شده که بیانگر تقدم آرسنوپیریت نسبت به پیرولوزیت است.

پیروتیت: کانی‌سازی پیروتیت بصورت افشان و در پهنه‌های اسکارنی به ویژه در پهنه آمفیبول اسکارن دیده می‌شود. همراهی آن با اکتینولیت و کلریت بیانگر ارتباط آن با مرحله پسرونده است. پیروتیت‌ها شکل‌دار بوده و فراوانی آن‌ها از ۱۰٪ تا ۱۵٪ متغیر است. در این مرحله همیافتی پیروتیت با پیریت-های نسل اول (شکل ۵ ث) که با فراوانی اندک و بصورت افشان دیده می‌شوند بیانگر شرایط تشکیل مشابه این دو کانه است. پیروتیت‌ها با پیریت نسل دوم و نیز کالکوپیریت جانشین شده-اند (شکل‌های ۵ ج وچ). جانشینی کالکوپیریت در همه موارد از لبه صورت گرفته است. بافت چشم پرنده‌ای به‌ویژه در پیروتیت به دلیل دگرسانی پیروتیت به پیریت دیده می‌شود [۲۰]. در سامانه Fe-S در دماهای بالای $۴۰۰^{o}C$، پیروتیت با پیریت در تعادل است که این نشان‌دهنده کاهش آهن با افزایش دماست [۲۲]. در دماهای بسیار بالا، پیریت با آزاد کردن گوگرد در فاز گازی می‌تواند به پیروتیت تبدیل شود. دمای اولیه این فروپاشی بین ^{o}C ۵۳۲ تا ^{o}C ۶۸۰ متغیر است. این حالت در یک پتانسیل شدیدا اکسایش-کاهش و در محلول‌های با ماهیت قلیایی که منجر به تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} می‌شوند، روی می-دهد. چنین تحولی برای پیدایش پیروتیت ضروری است [۲۳]. نسبت آهن به گوگرد در دمای زیر ^{o}C ۴۰۰ افزایش می‌یابد [۲۲]. از طرفی در دمای بیش از ^{o}C ۵۳۲، گوگرد در فاز گازی از شبکه پیریت خارج شده و پیروتیت تشکیل می‌شود [۲۳]. پیروتیت در دو نسل تشکیل شده است: نسل اول در حال تبدیل شدن به پیریت بوده ولی نسل دوم سالم و شکل‌دار است. در اثر تبدیل پیروتیت نوع اول به پیریت ثانویه، حاشیه‌ای از پیریت پیرامون پیروتیت ایجاد می‌شود [۱۹]. بنابراین ایجاد بافت گل کلمی و خوشه‌انگوری در پیریت‌های منطقه را می‌توان به خروج گوگرد در فاز گازی و در دمای حدود ^{o}C ۴۰۰ تا ^{o}C ۵۳۲ نسبت داد. این فرایند باعث کاهش نسبت گوگرد به آهن شده و سرانجام به دلیل کمبود گوگرد، پیریت به پیروتیت دگرسان می‌شود.

پیریت: این کانه در منطقه مورد بررسی بیشتر در پهنه‌های اسکارنی و با بافت افشان و جانشینی حضور دارد. در پهنه‌های کانی‌سازی اکسیدی، بقایایی کمی از پیریت بصورت بی‌شکل دیده می‌شود. فراوانی آن در پهنه‌های اسکارنی به ویژه آمفیبول اسکارن به حدود ۵٪ تا ۱۰٪ می‌رسد و با پیروتیت و کالکوپیریت همیافت است. شکل بلورهای پیریت وابسته به طی

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

زمان تشکیل دماست. براین اساس در دماهای کمتر یا مساوی ۲۵۰ ^oC، بلورهای پیریت شکل مکعبی با سطوح تخت و آینه‌ای دارند و با افزایش دما تا ۴۵۰^oC، بلورهای مکعبی با شیارهای فراوان تشکیل می‌شوند [۲۴]. بنابراین، وجود بلورهای پیریت با سطوح شیاردار در نمونه‌های مورد بررسی، بیانگر دمای تشکیل حدود ۴۵۰ ^oC است [۲۵]. پیریت مشخصاً دو نسل کانی‌سازی را نشان می‌دهد. نسل اول که شکل‌دار بوده و بصورت افشان و همیافت با پیروتیت دیده می‌شود (شکل ۵ پ) و نسل دوم که به صورت ثانویه جانشین پیروتیت شده است (شکل ۵ ج).

کالکوپیریت: این کانه در پهنه‌های اسکارنی به‌ویژه آمفیبول اسکارن و در همیافتی با پیریت نسل دوم و پیروتیت دیده می-شود. کالکوپیریت با فراوانی ۱٪ تا ۵٪ و اندازه ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر و اغلب بی‌شکل دیده می‌شوند. بلورهای نیمه شکل‌دار بافت افشان دارند ولی بیشتر بلورها بی‌شکل هستند و بافت جانشینی را نشان می‌دهند. در همه موارد این جانشینی در لبه پیروتیت رخ داده است (شکل ۵ چ). همیافتی کالکوپیریت و پیروتیت با ترمولیت و اکتینولیت و نیز جانشینی بجای پیروتیت بیانگر این است که کالکوپیریت در مرحله پسرونده تشکیل شده است.

گوتیت: گوتیت اغلب به صورت رگه-رگچه در سنگ میزبان آهک بلوری و در قسمت‌های جنوب غرب منطقه دیده می‌شود و در نمونه دستی و قطعه‌های صیقلی بافت گل کلمی آن به خوبی مشهود است (شکل ۵ ح). عرض رگه‌ها از یک متر تا کمتر از پنج متر متغیر است. بافت گل کلمی در گوتیت نشان-دهنده تشکیل آن در دمای پایین است. این کانی تا دمای ^oC ۱۳۰ پایدار است [۲۳]. بنابراین، کانی‌های آهن‌دار در دمای پایین تر از ۱۳۰ ^oC گوتیتی می‌شوند [۲۶]. گوتیت در برخی موارد با هسته پیریت دیده می‌شود. پدیده اکسایش و انحلال سطحی در کانی‌های سولفیدی باعث خروج یون گوگرد از محیط شده و اکسیدهای آهن بر جای می‌مانند. شاهد این امر بافت منطقه‌بندی در گوتیت با هسته‌ای از پیریت است [۲۷]. این کانه در مقاطع صیقلی گاهی بافت خوشه انگوری و شعاعی هم مرکز نیز نشان می‌دهد. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز در فضاهای باز (پهنه‌های گسلی منطقه مورد بررسی) و در نتیجه چرخش آبهای جوی، نوعی رشد هم‌مرکز با حالت خوشه انگوری را بوجود می‌آورند که رشد آن‌ها از دیواره‌های رگچه به سمت مرکز است [۲۰]. در قطعه‌های صیقلی گاهی حالت محصور شدگی هماتیت توسط گوتیت دیده می‌شود (شکل ۵ ح) که نتیجه تشکیل مستقیم گوتیت از اکسید آهن (Fe_2O_3) است [۲۸].

مالاکیت: فراوانی این کانه در منطقه مورد بررسی محدود است و در قسمت‌های جنوبی بصورت رگچه‌ای دیده می‌شود. عرض رگچه‌ها در حد چند سانتیمتر بوده و تراکم آن‌ها بسیار کم است. سنگ میزبان آن آهک بلوری است و همراه با اکسیدهای آهن و هماتیت و لیمونیت دیده می‌شود.

توالی همبری

در بیشتر کانسارهای اسکارنی، نخست کانی‌های آهکی سیلیکاتی تشکیل شده و سپس اکسیدها و سولفیدها بر اثر کنترل شیمیایی سیال‌های ماگمایی بوجود می‌آیند [۲۹-۳۱]. پیروکسن در دمای بیشتری نسبت به آندرادیت تشکیل می-شود. پیروکسن در شرایط ناپایدار به آمفیبول و آندرادیت به کوارتز و مگنتیت تجزیه می‌شود [۱۷، ۳۲]. در مقاطع مورد بررسی شده از منطقه سنجدک III، آمفیبول بصورت سوزنی شکل در لبه پیروکسن دیده می‌شود که ناشی از تجزیه این کانی است. در کانسار کامی اوکای ژاپن، پیروکسن هدنبرگیتی نقش مهمی را در احیای محلول‌های گرمابی و در نتیجه تشکیل کانی‌های سولفیدی بعدی داشته است [۳۳]. در مقاطع مورد بررسی نیز همیافتی سولفیدها با اکتینولیت به خوبی دیده می‌شود که نشان می‌دهند. تشکیل سولفیدها پس از پیروکسن و آمفیبول و در زیرمرحله پسرونده آغازی است. تشکیل کالکوپیریت پس از پیریت و پیروتیت با بافت جانشینی لبه‌ای مشخص می‌شود. تشکیل پیرولوزیت پس از مگنتیت و آرسنوپیریت با روند پر شدن رگچه‌ها قابل توجیه است. هماتیت با بافت مارتیتی‌شدن و نیز اکسید شدن مگنتیت، در سطح تشکیل می شود. شکل‌گیری گوتیت نیز پس از سولفیدها بوده و با مشاهده بقایای پیریت در گوتیت مشخص است. مالاکیت بصورت ثانویه در سطح تشکیل شده و شاخص پهنه-های اکسایشی است که در مراحل پایانی پدید آمده است (شکل ۶).

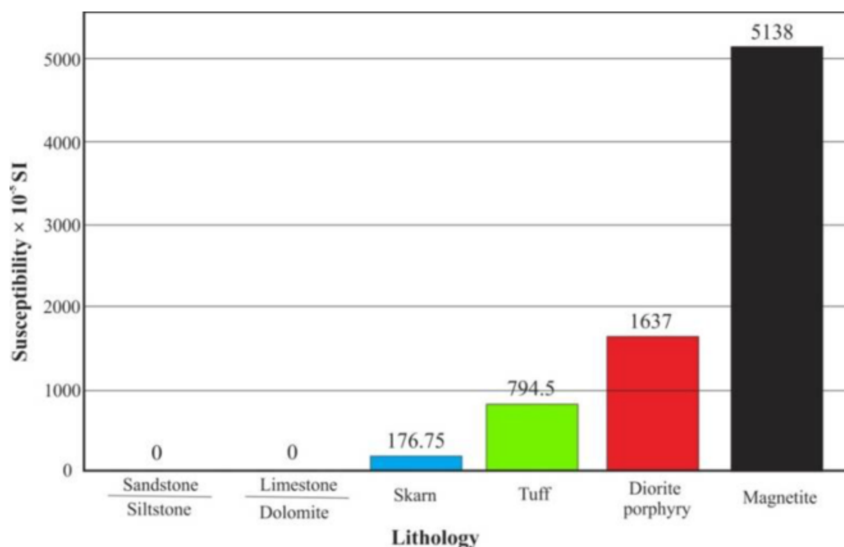
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]



شکل ۶ توالی همبری کانی‌ها در نهشته معدنی سنجدک III، بخش شرقی معدن سنگ آهن سنگان.

اکتشاف مگنتیت به روش مغناطیس‌سنجی

با توجه به ویژگی مغناطیسی این نوع کانسارها، روش مغناطیس‌سنجی بهترین روش زمین فیزیکی برای اکتشاف مستقیم کانه‌زایی‌های آهن نوع مگنتیتی است [۳۴-۳۷]. تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی با در نظر گرفتن پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های منطقه امکان‌پذیر است. بدین منظور، پذیرفتاری مغناطیسی ۶۰ نمونه از واحدهای سنگی و نمونه-های شامل کانی‌سازی آهن برداشت شده از منطقه سنجدک III، اندازه‌گیری و میانگین این مقادیر محاسبه شد (شکل ۷).



شکل ۷ مقایسه پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای زمین‌شناسی مختلف با کانسنگ مگنتیت موجود در منطقه مورد بررسی.

به منظور برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی، نخست شبکه‌بندی در گستره‌ای به وسعت ۳۰۰×۲۳۰ متر مربع برای دو رخنمون اصلی مگنتیت انجام شد. با توجه به شکل و ابعاد رخنمون‌ها، ۲۲ نیمرخ اصلی در راستای شمال-جنوب و با فاصله ایستگاهی ۱۰ متر در نظر گرفته شد. فاصله بین نیمرخها ۱۰ متر، طول متوسط آن‌ها ۲۵۰ متر و نقاط بررسی شده در مجموع ۵۸۶ عدد بود. پس از برداشت، تصحیح مربوط به اثر روزانه به روش حلقه بر داده‌ها انجام شد. تغییرات میدان ناشی از فعالیت‌های خورشیدی براساس پایگاه‌های معتبر دنیا (NOAA[1]) آرام و ناچیز است. با توجه به رخنمون ماده معدنی در سطح و تفاوت آشکار شدت میدان نسبت به سنگ‌های اطراف، نیازی به تصحیح میدان اصلی نبود و سرانجام نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) تهیه گردید (شکل ۸ الف).

دو ناهنجاری مجزا (A و B) در راستای شمال شرق-جنوب غرب و یک ناهنجاری ضعیف (C) در شرق نقشه TMI شناسایی شد. با توجه به پذیرفتاری‌های اندازه‌گیری شده، کانی‌سازی مگنتیت (با پذیرفتاری مغناطیسی 5138×10^{-5} SI) در مرز بین واحد آهکی غیرمغناطیسی (با پذیرفتاری مغناطیسی صفر) و اسکارن (با پذیرفتاری مغناطیسی 176.75×10^{-5} SI) قرار دارد. چنانچه کانی‌سازی همراه و یا در نزدیکی توده نفوذی با پذیرفتاری مغناطیسی 1637×10^{-5} SI باشد، پاسخ مغناطیسی توده نفوذی با پاسخ کانی‌سازی تداخل نموده و ناهنجاری کاذب ایجاد می‌کند که تفسیر آن مشکل است. در محل برداشت‌های مغناطیس‌سنجی، آثاری از توده نفوذی وجود ندارد. بنابراین عامل ایجاد ناهنجاری‌های دیده شده بدون تردید کانی‌سازی مگنتیت است. به دلیل میل مغناطیسی ناهنجاری‌های مغناطیسی، در نقشه مغناطیس کل (شکل ۸ الف)، شدت کل میدان بر عامل ایجاد خود قرار نمی-گیرد و باید از نقشه برگردان به قطب استفاده شود.

نقشه انتقال به قطب (RTP): با استفاده از این صافی می‌توان میدان مغناطیسی را از یک میل مغناطیسی، جایی که میدان زمین شیب‌دار است، به میدان در قطب مغناطیسی با میل عمودی انتقال داد. در این حالت، ناهنجاری بطور عمود در بالای عامل ایجاد خود قرار می‌گیرد [۳۸]. نقشه برگردان به قطب منطقه مورد بررسی در شکل ۸ ب آورده شده است. در این شکل، مکان‌های کانی‌سازی که در نقشه مغناطیس کل (TMI) نسبت به محل ناهنجاری‌ها جابجایی نشان می‌دادند به خوبی بر منبع ایجاد کننده خود قرار گرفته‌اند. این نقشه نیز گسترش عمقی کانی‌سازی مگنتیت را بیش از آنچه که رخنمون دارد نشان می‌دهد. به منظور تفسیر بهتر نتایج مغناطیس‌سنجی، نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی بر نقشه انتقال به قطب (RTP) با مقیاس مشابه، در منطقه مورد بررسی بر هم منطبق شدند (شکل ۹).

کانی‌سازی مگنتیت در سطح بصورت دو رخنمون مجزا در غرب و شرق نقشه انتقال به قطب (RTP) ظاهر شده است. رخنمون غربی با ناهنجاری مغناطیسی قوی‌تر A و رخنمون شرقی بر ناهنجاری ضعیف‌تر C منطبق هستند. ناهنجاری A با راستای شمال شرق که بسیار گسترده‌تر از رخنمون مگنتیت است با آن هم مکانی بسیار خوبی دارد. در محل ناهنجاری B رخنمون کانی‌سازی مگنتیت وجود ندارد، اما مانند ناهنجاری A عامل ایجاد آن بدون شک کانی‌سازی مگنتیت است و کمی جابجایی در راستای جنوب شرق نشان می‌دهد ولی راستای آن مانند ناهنجاری A شمال شرقی است. جابجایی ناهنجاری B نسبت به ناهنجاری A و همچنین جابجایی رخنمون‌های مگنتیت در شرق و غرب نقشه انتقال به قطب (RTP)، به گسل‌های اصلی و فرعی مربوط است (شکل ۹). همچنین همراستا بودن ناهنجاری‌های مغناطیسی A و B (در راستای شمال شرق-جنوب غرب) نشان‌دهنده روند یک گسل است که با گسل اصلی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ [۱۱] و نقشه زمین‌شناسی تهیه شده در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ همخوانی کامل دارد.

نقشه مشتق اول قائم: نقشه گرادیان قائم از آنجا که نوعی صافی بالاگذر است، تصویری پالوده از میدان مغناطیسی فراهم می‌کند که ویژگی‌های منابع مغناطیسی نزدیک سطح زمین را برجسته می‌سازد [۳۹، ۴۰]. محاسبه مشتق میدان، روشی پُر-کاربرد برای نمایان کردن ناهنجاری‌های محلی است. اثر این روش تضعیف ناهنجاری‌های منطقه‌ای و تقویت بی‌هنجاری محلی است [۳۴]. بنابراین برای تشخیص ناهنجاری‌های محلی نزدیک به سطح، نقشه مشتق قائم مرتبه اول تهیه شد (شکل ۱۰ الف). این نقشه نشان می‌دهد که کانی‌سازی مگنتیت در خارج از محل رخنمون نیز در عمق کم وجود دارد.

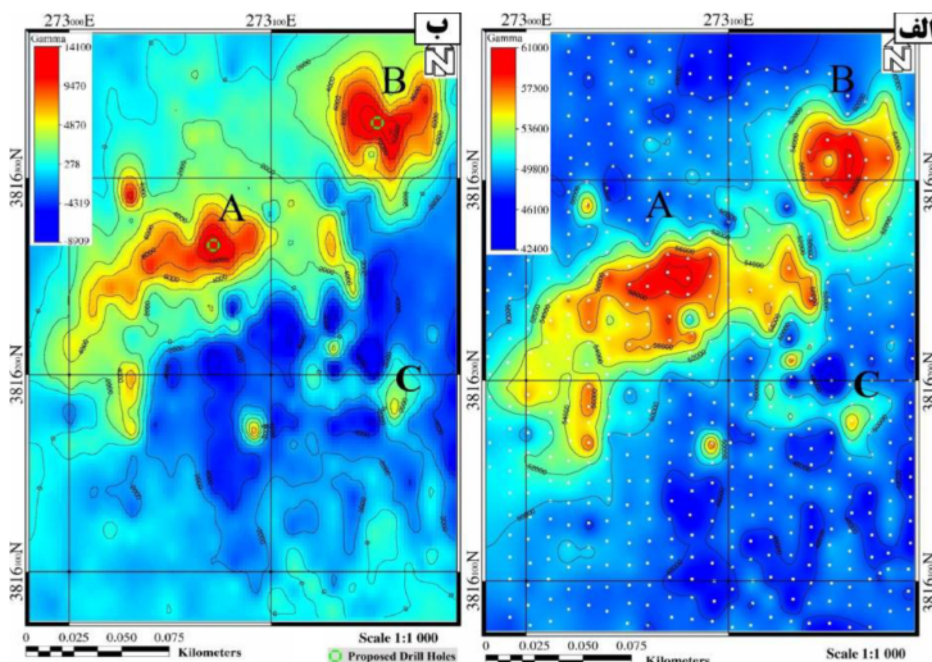
1 - National Oceangraphic and Atmospheric of America

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

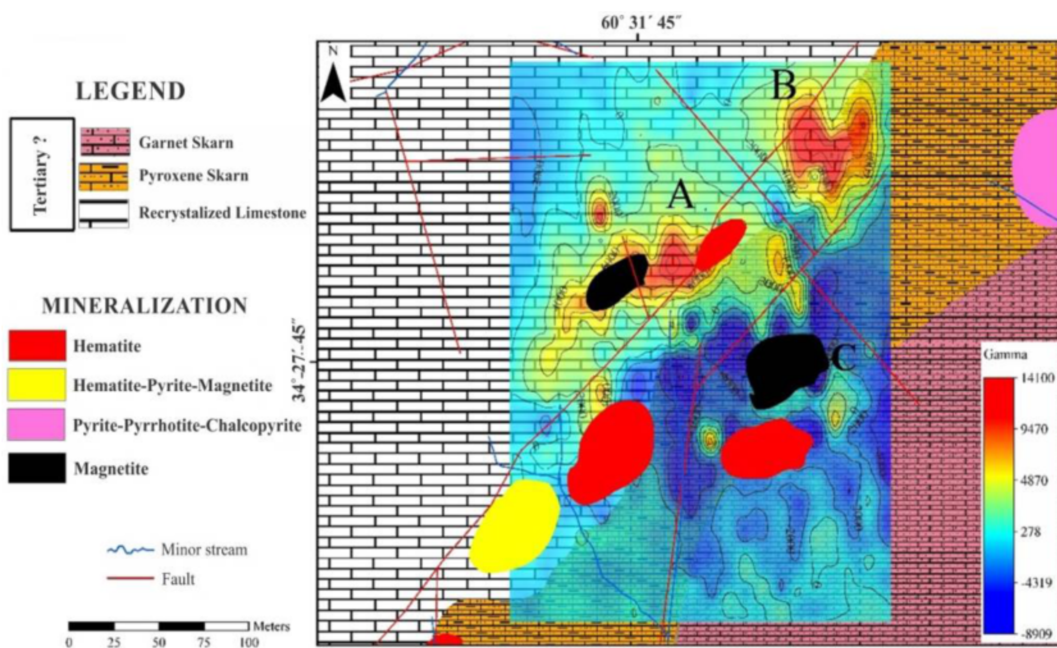
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

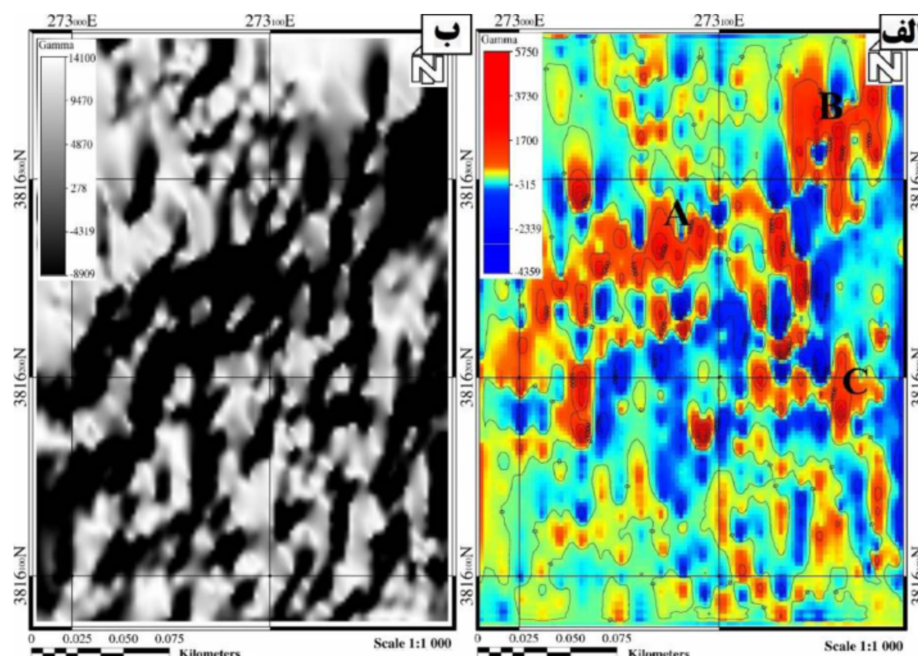
صافی سایه (Shading): نقشه‌های سیاه و سفید تابش نور (سایه) تهیه شده از نقشه انتقال یافته به قطب (RTP) برای نمایان سازی ساختارهای خطی به کار می‌رود. در این صافی، نور با زاویه ۴۵ درجه و با آزیموت‌های مختلف بر نقشه انتقال یافته به قطب فرود آمد. در نتیجه این امر، ساختارهای خطی در دو آزیموت °۳۱۵ و °۱۳۵ بطور محسوسی نمایان شدند (شکل ۱۰ ب). نتایج این صافی با ساختارهای خطی (گسل‌ها) در راستای شمال شرق-جنوب غرب در نقشه مرجع [۱۱] و نیز نقشه زمین‌شناسی تهیه شده در این پژوهش همخوانی کامل دارد (شکل‌های ۸ ب و ۱۰ ب).



شکل ۸ الف) نقشه مغناطیس کل (TMI) همراه با نمایش جایگاه ایستگاه‌های برداشت شبکه مغناطیس‌سنجی زمینی، منطقه سنجدک III، ب) نقشه انتقال به قطب (RTP) به همراه نقاط حفاری پیشنهادی در مرکز ناهنجاری‌های زمین مغناطیسی A و B.

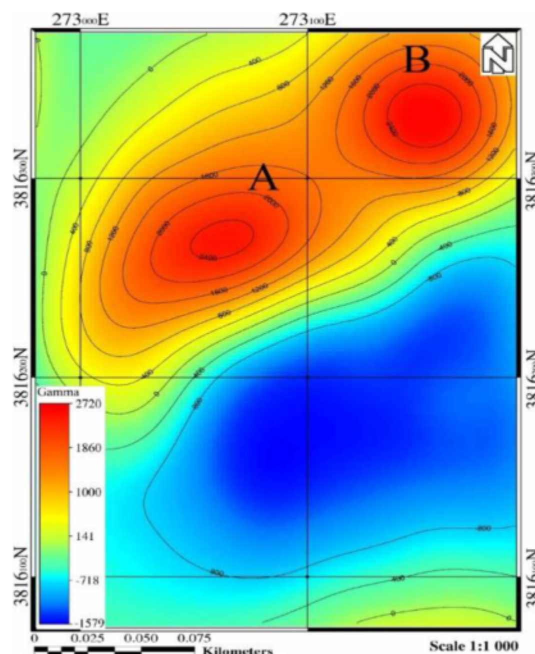


شکل ۹ نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی به همراه نقشه برگردان به قطب (RTP) با مقیاس‌های مشابه.



شکل ۱۰ الف) نقشه مشتق اول قائم برای تشخیص ناهنجاری‌های محلی نزدیک به سطح در محل ناهنجاری‌ها، ب) صافی سایه با آزیمـوت ˚۳۱۵ و بارزسازی خطواره‌های ساختاری در راستای شمال شرق- جنوب غرب.

نقشه فراسو: این صافی اثر منابع محلی و کم عمق ناهنجاری‌ها را که در نقشه‌های گرادیان قائم آشکار بود تضعیف کرده و در عوض اثر منابع عمیق را تقویت می‌کند [۳۴]. با اِعمال این صافی می‌توان اطلاعات کیفی از گسترش عمقی خاستگاه (در اینجا توده مگنتیتی) بدست آورد. بنابراین نقشه فراسو در ارتفاع های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری تهیه شد که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۱۱ آمده است. چنان که دیده می‌شود، ناهنجاری‌های A و B در منطقه مورد بررسی دارای پاسخ عمقی بوده و در عمق به هم وابسته هستند، ولی ناهنجاری C در فراسوی بیشتر از ۱۰ متر پاسخی ندارد که نشان از کم عمق بودن آن دارد.



شکل ۱۱ نقشه فراسوی ۳۰ متر برای بررسی اطلاعات کیفی از گسترش کانه‌زایی در عمق.

برداشت

بر اساس شواهد صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی و با تأکید بر شواهد همبرزایی، می‌توان گفت که مجموعه پهنه‌های اسکارنی در منطقه سنجدک III اندواسکارن نیستند و به صورت اگزواسکارن رخنمون دارند. با توجه به بررسی‌های کانی-سازی، پیریت دست کم در دو نسل تشکیل شده و بافت خوشه انگوری در پیریت‌های نسل دوم به آزادسازی گوگرد در یک فاز گازی (دمای حدود ^{o}C ۵۳۲-۴۰۰) مربوط است. بافت منطقه-بندی در مگنتیت مربوط به آزادسازی سریع مواد فرار از یک محلول ابر اشباع از آهن در نزدیکی سطح زمین است. نقشه انتقال به قطب (RTP) دو ناهنجاری A و B را در راستای شمال شرق-جنوب غرب نشان می‌دهد.که هماهنگ با راستای گسل در نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی هستند. ناهنجاری A منطبق بر رخنمون مگنتیت در قسمت غربی منطقه است و گسترشی بیش از سه برابر آن را در راستای شمال شرق-جنوب غرب در عمق نشان می‌دهد، ولی ناهنجاری B بر رخنمون مگنتیتی منطبق نیست. با توجه به نبود توده نفوذی در محل ناهنجاری‌ها و همچنین انطباق یکی از ناهنجاری‌های مغناطیسی بر رخنمون مگنتیت و نیز راستای یکسان آن‌ها، می‌توان گفت که عامل ایجاد هر دو ناهنجاری کانی‌سازی مگنتیت است. پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی در نقشه فراسو نشان دهنده عمقی بودن و یکی بودن خاستگاه این دو ناهنجاری مغناطیسی است که با شواهد کانی‌شناسی از جمله بافت منطقه‌بندی دیده شده در مگنتیت همخوانی دارد. ناهنجاری مغناطیسی C نیز که بر رخنمون مگنتیت در بخش-های شرقی منطقه منطبق بوده ضعیف‌تر است و در نقشه‌های فراسوی بیش از ۱۰ متر پاسخی ندارد که این امر بیانگر کم عمق بودن این ناهنجاری است. جدایش در ناهنجاری‌های مغناطیسی و رخنمون‌های مگنتیت هر دو به عملکرد گسل‌های اصلی و فرعی مربوط است. با توجه به انطباق نقشه‌های زمین-شناسی و نقشه انتقال به قطب (RTP)، همراستا بودن ناهنجاری‌های A و B، کنترل گسلی بودن کانی‌سازی مگنتیت را می‌رساند و این امر با صافی‌های اِعمال شده بر داده‌های مغناطیسی همخوانی دارد.

قدردانی

از شرکت سنگ آهن شرق ایران و پرسنل محترم معدن سنگان برای در اختیار قرار دادن امکانات اسکان، غذا و حمل و نقل صمیمانه متشکریم. همچنین از همکاری جمعی از دانشجویان کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد در عملیات برداشت مغناطیس‌سنجی سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Stocklin J., "*Structural history and tectonics of Iran: a review*" AAPG bulletin 52 (7) (1968): 1229-1258.

[2] Aghanabati S.A., "*Geology of Iran*", Geological survey of Iran Press (2004) 586 p.

[3] Karimpour M.H., "*Mineralogy, alteration, rock origin and tectonic environment of Cu-Au Iron-Oxides deposits and examples from Iran*", The 11th Iranian Conference on Crystallography and Iranian Mineralogy, Yazd University (2003) 184-189.

[4] Boroumandi M., "*General report on the preliminary study of Sangan ore deposit in Khorasan*", Geological Survey of Iran (1983) 263 p.

[5] Golmohammadi A., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S. A., "*Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton atthe Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran*", Ore Geology Reviews 65 (2) (2015) 545-563.

[6] Golmohammadi A., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazaheri S. A., "*Petrology and U-Pb zircon dating of intrusive rocks from A, C-south, and Dardvay districts, Sangan iron stone mine, Khaf*", Journal of Economic Geology 5 (2) (2014).

[7] Golmohammadi A., Haidarian Sahahri M.R., Mazaheri S. A., Rahimi B., Karimpour M H., *"Interpretation of the magnetic anomalies of the western mines of Sangan Ironstone using geology and borehole data"*, Iranian Journal of Geophysics 11 (2) (2017) 87-109.

[8] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., *"Comparison of the geochemistry of source rocks at Tannurjeh Au-bearing magnetite & Sangan Au-free magnetite deposits, Khorasan Razavi, Iran",*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]

313-326.

[20] Craig R. J., Vaughan J. D., "*Ore microscopy and ore petrography*", John Wiley and Sons interscience publication (1981) 406p.

[21] Shakerdpour Z., Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., "*Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Senjedak II at the East of Sangan Iron Ore, Khaf*", 6th Conference of Iranian Society of Economic Geology, Zahedan (1393).

[22] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "*An introduction to the rock-forming minerals*", Hong Kong: Longman Scientific and Technical (1992) 696 pp.

[23] Smirnov, "*Geology of Mineral Deposits*", Moscow, Mir Publishers, (1976) 520 p.

[24] Murowchick J. B., Barnes H. L., "*Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology*", American Mineralogist 72 (1987) 1241-1250.

[25] Barani N., "*Economic Geology of Surveyor Iron Deposit, Delijan (Markazi Province)",* M.S thesis, Lorestan Univ, Iran, (2013) 126 p.

[26] Karami, A., *"Economic geology of Anjireh Malayer scarn, West Iran",* M.S thesis, Lorestan University (2013).

[27] Boomeri M., "*Sangan Iron Ore Genesis in Khorasan",* M.S thesis, Tarbiat Moalem Univ, Iran, (1992) 215 p.

[28] Guillbert J. M., Park C. F., "*The geology of ore deposits*", W.H.Freeman and company (1986).985p.

[29] Whitney D.L., Evans B.V., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals",* American Mineralogist 95 (2010) 185–187.

[30] Burton J. C., Taylor L. A., Chou I. M., "*The fO_2-T and fS_2-T stability relations of hedenbergite and hedenbergite-johannsenite solid solutions*", Economic Geology 77 (4) (1982) 764-783

[31] Mazaheri S. A., And Chenhal B. A., "*Pressure, temperature and composition of fluid of magnetite skarns Sangan Khaf, Khorasan*", 2nd Conference of Iranian Geological Society, Ferdowsi University of Mashhad (1998) 451-454.

[32] Einaudi M. T., "*Skarn deposits*", Economic Geology, 75th Anniversary Volume (1981) 317-391.

[33] Kato Y., "*Genesis of the Kamioka Skarn*

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 14 (1) (2006) 3-26.

[9] Mazhari N., Malekzadeh Shafaroudi A., and Ghaderi M., "*geochemistry of intrusive rocks, petrology of skarn, and mineralogy and chemistry of ore bodies in the senjedak-i area, east of sangan mine, khaf, ne iran*" (2016) 235-246.

[10] Mazaheri S. A., "*Petrological studies of skarns from Marulan South, New South Wales, Australia and Sangan, Khorasan, Iran*", Ph.D. thesis, University of Wollongong, New South Wales, Australia (1995).

[11] Madankav Engineering consultant., *"Detailed exploration report, geophysics and drilling of Dardvey and Baghak anomalies (Sangan mines) ",* Internal report, (2006) 230p.

[12] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., *"Geochemistry and mineralogy of skarn zones and petrology of source rock Sangan iron mine, Khorasan Razavi, Iran",* Scientific Quarterly Journal, Geosciences 65 (2007) 108–125.

[13] Karimpour, M. H., *"Investigation on the origin and formation of Sangan iron deposit in Khorasan"*, Iron Ore Seminar, Faculty of Engineering, University of Tehran (1990).

[14] Alavi Naeini M., *"Taybad geological map at the scale 1/250000",* (1982).

[15] Cudennece Y., Lecerf A., "*Topotactic transformations of goethite and lepidocrocite into hematite and maghemite*", Solid State Sciences 7 (5) (2005) 520-529.

[16] Ramdohr P., "*The ore minerals and their intergrowths*", pergamon press, 1-2, (1980) 1205p.

[17] Einaudi M. T., Burt D. M., "*Terminology, classification and composition of skarn deposits*", Economic Geology 77 (4) (1982) 745-754.

[18] Henriqueze F., Martin R. F., "*Grystal-growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile*", Canadian Mineralogist 16 (4) (1978) 581-589.

[19] Kaheni Sh., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., *"The geochemistry and mineralogy of North C ore body and Baghak anomaly and determination of two Pyrrhotite generations which are different in composition in Sangan mine, eastern Iran",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2) (2008)

[37] Donohue J., Hil Q., Brewster D., "*Geophysics at the Howsons Iron Project, NSW-Eastern Australias new magnetic resources*", Australian Society of Exploration Geophysics (2012).

[38] Arkani H. J., Urquhart W. E. S., "*Reduction to pole of North American magnetic anomalies*", Geophysics 55 (9) (1990) 218-255.

[39] Cooper G. R., Crown D. R., "*Filtering using variable order vertical derivative*", Computers and Geosciences 30 (5) (2004) 455- 459.

[40] Ford K., Keating P., "*Thomas M. D., Overview with Canadian ore deposits, Geological Survey of Canada*", 601 Booth street, Ottawa, Ontario, K1A0E8, Open File 8345, (2004) 90 p.

Deposits: An Important Role of Clinopyroxene Skarn and Graphite bearing Limestone in Precipitating Sulfide Ore", Resource Geology 49 (4) (1999) 213-222.

[34] Heydarian Shahri M. R., "*Foundations of Geophysical Exploration*", Ferdowsi University Press, Mashhad (2005).

[35] Zomorodian H., Hajib Hoseinieh H., "*Applied Geophysics*", Volume I, Third Edition, Tehran University Press (2008).

[36] Dobrian M. B., Savit C. H., "*Introduction to Geophysical Prospecting*", McGraw-Hill Inc. New York (1998) 639 p.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.12.2]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.171]